ChinaXiv合作期刊

第40卷 第5期
2023年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 5
May 2023

北大西洋海温对宁夏春末夏初降水影响及成因研究

杨建玲[1,2,3]， 张肃诏[1,2]， 马珺玢[1,2]， 王 岱[1,2]， 黄 莹[1,2]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002；
2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室，宁夏 银川 750002；3. 宁夏回族自治区气象科学研究所，宁夏 银川 750002）

摘 要： 利用宁夏20个气象站月降水资料、NCEP/NCAR再分析大气资料，以及Hadley中心海表面温度资料，采用经验正交分解、合成分析和典型相关分析等方法，分析了北大西洋海温异常与宁夏春末夏初4—6月降水异常的关系及其年代际变化。发现北大西洋海温异常与宁夏4—6月降水之间的相关关系自1961年以来总体呈持续增强趋势，20世纪80年代之前关系不显著，之后相关关系持续显著。20世纪80年代以来，前期冬、春季北大西洋海温异常可引起宁夏4—6月降水异常，但各月异常存在差异。对应“三极子型”海温异常正（负）位相，宁夏4月降水偏多（偏少），5月偏少（偏多），6月北少南多（北多南少）。进一步揭示出北大西洋海温异常通过引起北半球欧亚中高纬大范围显著异常波列而影响宁夏降水异常的过程机理，并指出该异常波列从春到夏季节转换中向北推进演变引起了各月降水异常差异的原因。前期持续异常的北大西洋“三极子型”海温异常正位相，4月在对流层中上层引起的异常波列在乌拉尔山东部和我国东部—日本海地区形成显著负、正异常中心，宁夏正好受该“西低东高”异常环流型影响，低层850 hPa异常偏南风，有利于输送南方暖湿气流，降水偏多。5月、6月随着北半球季节由春到夏季转换，异常波列向北发展推进，5月我国东部—日本海地区的高度场正异常中心向北移至贝加尔湖以南地区，宁夏受其控制，低层异常风场辐散，降水偏少。6月贝加尔湖以南地区的高度场正异常中心继续向北移到贝加尔湖以北地区，并与我国东部正异常区分裂，形成两个正异常中心，使得宁夏北部受“北高南低”高度场异常影响，而南部受“西低东高”控制，低层宁夏北部异常偏东北风，气流辐散，宁夏南部弱异常偏南风，气流辐合，有利于6月宁夏降水北少南多。对于北大西洋“三极子型”海温异常负位相则相反。研究结果为深入理解宁夏春末夏初降水异常成因及预测提供了科学参考依据。

关键词： 北大西洋；“三极子型”海温异常；降水；影响成因；宁夏

北大西洋海表面温度（SST）的变化与北大西洋涛动（NAO）密切相关，在月和季节尺度上北大西洋热带外SST的分布由其上方大气驱动[1]，Bjerknes[2]早期研究发现北大西洋SST随大气变化而变化，其冬季主要的模态“三核”结构（亦称“三极子”），是由大气NAO强迫海洋的结果，后来很多观测分析和模拟研究都证实了这一点[3-6]。NAO增强时，冰岛低压加深，其西侧北风异常带来高纬度冷空气，海气温差加大，海洋通过感热通量损失的热量也增加，拉布拉多海区失热降温；中纬度海区由于亚速尔高压加强使得30°N附近西风减弱，感热通量和潜热通量损失变小，海洋增温；副热带海区则由于高压南侧信风增强，海洋失热增强，形成高、中、低纬度海温异常“－＋－”的“三极子”结构。然而NAO对北大西洋上层海洋异常信号并非只有单向作用，北大西洋海温异常的“三极子”模态能够对随后的大气NAO产生正反馈作用[7-9]。

北大西洋海温异常不但对其上空的区域性气候有重要影响[10]，而且能够通过激发欧亚中高纬度异常波列而影响东亚季风区气候[11-18]，另外对位于热带地区的南海和孟加拉湾反气旋[19]、太平洋西北部副热带高压[20-21]等影响中国气候异常的主要大气环流系统也有显著影响。有最新研究[22-23]发现北大西洋海温异常对2016年中国夏季降水有显著影响。宁夏地处中国西北地区东部中心区域，属于干旱、半干旱地区，降水异常变化对于宁夏农业生产

收稿日期： 2022-06-23； **修订日期：** 2022-08-18
基金项目： 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J024)；国家自然科学基金区创新发展联合基金（U22A20577）
作者简介： 杨建玲（1973-），女，博士，主要从事气候与气候变化、气候预测，海气相互作用研究. E-mail: yangjianlingbox@sina.com

chinaXiv:202305.00255v1

ChinaXiv合作期刊

和生态环境建设影响重大。已有较多研究揭示出热带太平洋和印度洋海温异常对西北地区东部和宁夏降水有显著影响[24-29]。关于北大西洋海温异常对西北地区东部降水影响的研究相对较少,近期有研究发现北大西洋海温与西北地区东部4月[30]和夏季降水异常有显著联系[24,31],而且这种关系在气候预测业务中也得到了较好应用。为了较全面理清北大西洋海温异常对宁夏春夏之交4—6月降水异常的影响,本文利用长时间序列资料研究了北大西洋海温异常主要模态与宁夏4—6月降水异常的关系及其年代际变化,并进一步揭示了海温与降水异常联系的大气环流异常成因及机理,研究结果有助于对宁夏降水异常成因的认识,并为预测提供了科学依据。

1　数据与方法

1961—2021年宁夏20个气象测站(图1)逐月降水量资料来源于宁夏气候中心,月平均500 hPa高度场、850 hPa风场资料来自美国NCEP/NCAR(https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html),1960—2021年逐月SST资料从Hadley中心获取(https://www.metoffice.gov.uk/),分辨为1°×1°。北大西洋"三极子"指数NATI数据来源于国家气候中心内网。

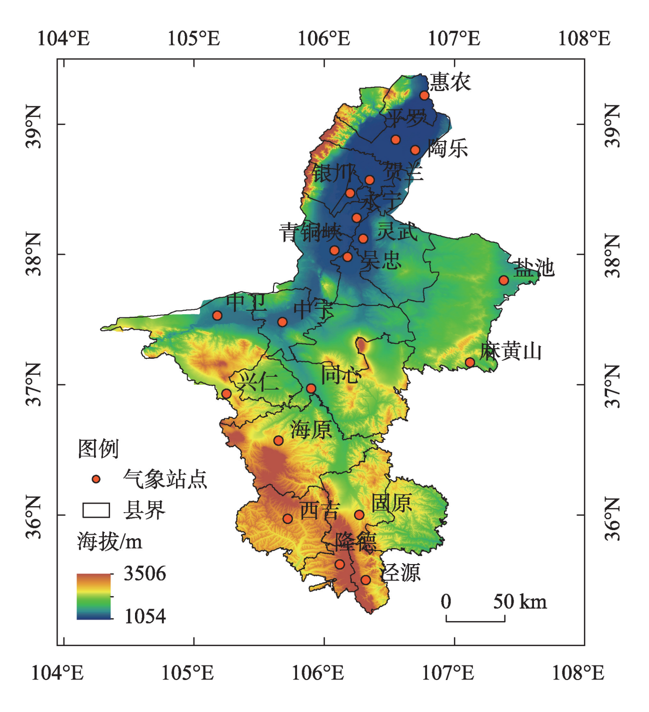


图1　宁夏气象站点示意图

Fig. 1　The schematic of the meteorological stations in Ningxia

当北大西洋中纬度区域(40°W~70°W,25°N~40°N)海温正异常,高纬度区域(20°W~50°W,50°N~60°N)和低纬度区域(20°W~60°W,10°N~20°N)海温负异常,NATI为正,对应北大西洋"三极子"为正位相,反之为负位相。本文中定义的"三极子型"正负位相与"三极子"正负位相似,只是中、高、低异常中心的区域范围分别略有差异。

采用经验正交分解方法EOF、典型相关、t检验等统计方法研究北大西洋海温对宁夏4—6月降水异常主要模态的影响,考虑到北半球20世纪70年代中后期的气候突变,以及20世纪80年代以来气候变暖等对北大西洋海温和宁夏降水关系的影响,选取1981—2020年,研究该时段内宁夏4—6月降水异常主模态EOF1、EOF2时间系数与北大西洋海温的空间相关关系,确定显著相关的海温异常分布模态。采用合成分析和波作用通量[32-33]研究海温异常引起的Rossby波异常传播影响降水的大气环流异常成因和机理。

2　宁夏4—6月降水异常主模态

宁夏春夏之交4—6月降水量年际异常变化对当地农作物播种、出苗和生态草地返青生长有重要影响。宁夏4—6月降水异常主要以全区域异常符号一致的EOF第一模态,以及南北区域异常符号相反的EOF第二模态为主,其中,5月第一模态的方差占比最高,为71%,4月、6月略低,分别为66.3%和61.6%;第二模态6月方差相对占比较大为13.7%,5月最小,为9.7%。4—6月逐月降水异常EOF1、EOF2两个模态的累计方差贡献率在75.3%~80.7%(表1),总体占比较大,故只分析北大西洋海温异常对宁夏4—6月降水异常EOF1、EOF2两个模态的影响。

表1　宁夏4—6月降水异常EOF1、EOF2的方差贡献及其累计方差贡献

Tab. 1　The variance contribution rates and their cumulative of precipitation anomaly EOF1、EOF2 in Ningxia from April to June　/%

模态	4月	5月	6月
EOF1	66.3	71.0	61.6
EOF2	12.5	9.7	13.7
EOF1、EOF2累计	78.8	80.7	75.3

chinaXiv:202305.00255v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202305.00255v1

宁夏4—6月降水异常EOF1空间分布很相似,均为全区异常符号一致的分布模态(图2a～图2c),异常大值区大都位于宁夏中部及其偏北地区,南北两头异常值较小;EOF1时间系数演变各月不同,其中,6月存在较明显的年代际变化特点,20世纪80年代中期以前,年际变率小,以后年际变率变大,其他各月的变化特点不明显。宁夏4—6月降水异常EOF2空间分布为南北降水异常符号相反的模态(图2d～图2f),正负分界线在盐池、同心、中卫和中宁一带,即引黄灌区和中部干旱带至南部山区异常符号相反;EOF2时间系数演变各月均有较明显年际变率(图3),但年代际趋势不明显。以6月为例,20世纪60—70年代年际变率较小,之后年际变率有所增大,结合空间分布和时间系数,近10 a宁夏6月降水EOF2以北少南多异常分布为主。

3　北大西洋海温异常与宁夏4—6月降水异常的关系及其年代际变化

3.1　海温与降水异常主模态的显著相关及差异

通过分析宁夏春夏之交4—6月逐月降水异常EOF1、EOF2主模态与超前0～6个月(0代表同期,下同)北大西洋海温异常(SSTA)的相关性(图4),发现宁夏4月降水EOF1、5月降水EOF1、EOF2,及6月EOF2与北大西洋SSTA存在持续稳定的显著相关性,相关显著的海温异常分布与北大西洋典型"三极子"的3个异常中心区域部分相似,但各月显著区域略有差异,故将本文的海温异常称为"三极子型"海温异常。

宁夏4月降水EOF1异常模态与前期1—3月和同期4月北大西洋海温异常均存在持续的显著相关

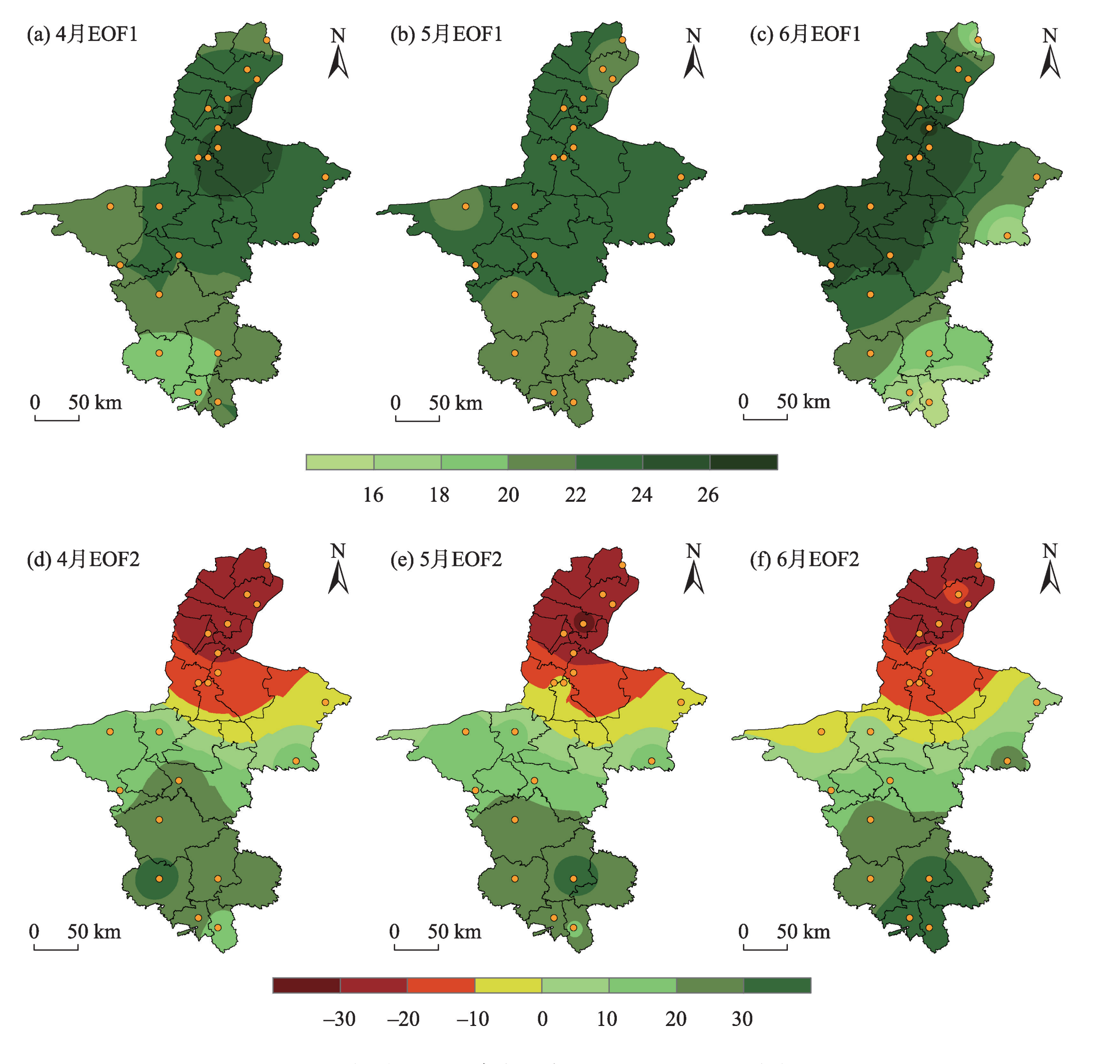


图2　宁夏4—6月降水异常EOF1、EOF2空间分布

Fig. 2　The spacial ditributions of precipitation anomalies EOF1、EOF2 in Ningxia from April to June

ChinaXiv合作期刊

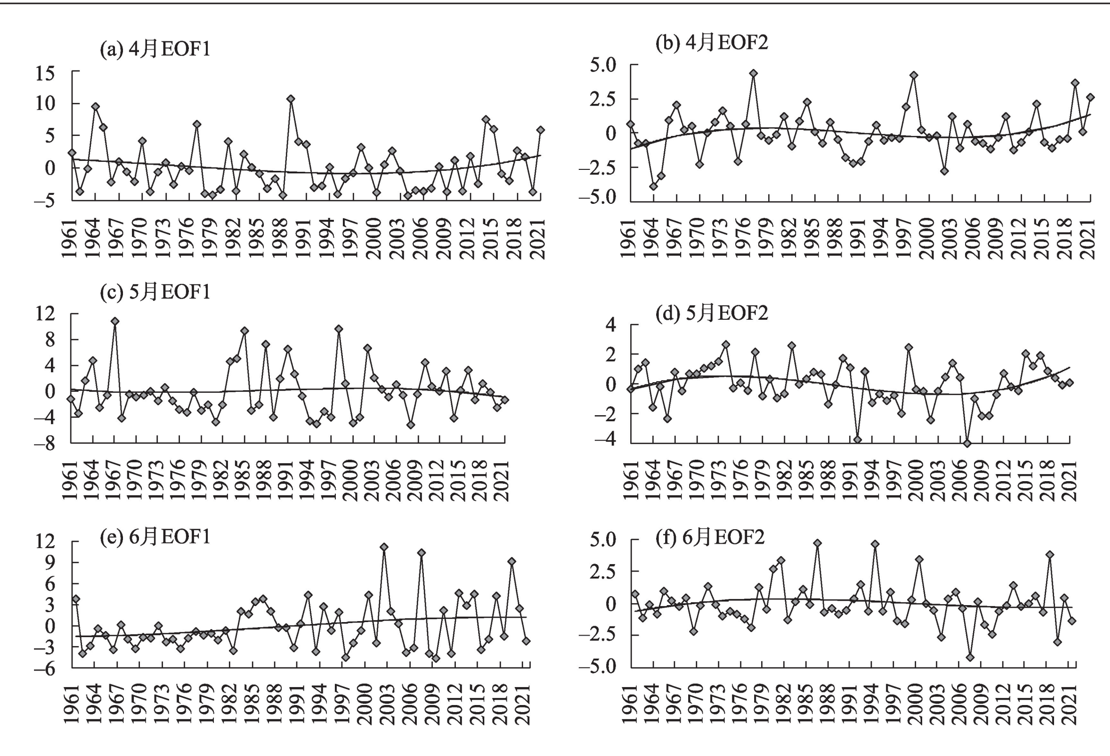


图3 宁夏4—6月降水异常EOF1、EOF2时间系数演变及趋势

Fig. 3 The EOF1、EOF2 time series and their trends of precipitation anomalies in Ningxia from April to June

性(图4a,图4b)。同期相关存在3个显著相关区域,分别位于北大西洋高纬度50°N、中纬度30°N和低纬度20°N附近,中纬度的相关性高且相关显著的区域较大,高纬度次之,低纬度最小,当海温超前1~3个月时,相关分布区域与同期大致相似,只是相关性有所减小,且低纬度区域的减小比较明显一些。根据相关分布,结合4月降水异常EOF1时间系数和空间分布可知,冬春季1—4月北大西洋中纬度区域海温正异常、高纬度和低纬度海温负异常,即"三极子型"正位相,宁夏4月降水易偏多。反之对应"三极子型"负位相,宁夏4月降水易偏少。另外通过宁夏引黄灌区、中部干旱带、南部山区3个不同区域平均的4月降水异常与北大西洋海温相关性分析发现,北部引黄灌区和南部山区降水异常对海温的响应比中部干旱带更显著。

与4月不同,宁夏5月降水异常EOF1和EOF2两个模态都与海温有显著相关性,且超前3~5个月,即前期12月—次年2月北大西洋SSTA存在持续显著相关,而与同期和超前1~2个月的海温相关性反而不显著,相关显著的区域范围与4月相比较小。与5月降水EOF1相关显著的海温异常区域,主要位于中、低纬度40°N和20°N附近(图4c,图4d),其中心位置正好位于典型北大西洋"三极子"中、低纬度异常中心附近。与5月降水异常EOF2相关显著的区域在高、中、低纬度存在3个显著区域,其与北大西洋典型"三极子"海温异常分布型对应的3个海温异常分布中心很相似。对应前期12月—次年2月北大西洋"三极子型"正位相,即北大西洋中纬度A1区域海温正异常、低纬度A3区域海温负异常(图4d),宁夏5月易出现全区降水偏少,反之偏多。前期12月—次年2月北大西洋中纬度A1区域海温正异常,高纬度A2区域和低纬度A3区域海温负异常(图4f)),宁夏5月降水易出现北部偏少,南部偏多,反之北部偏多,南部偏少。综合来看,北大西洋"三极子型"正(负)位相,易引起宁夏5月全区降水偏少(偏多),且北部偏少(偏多)更明显。

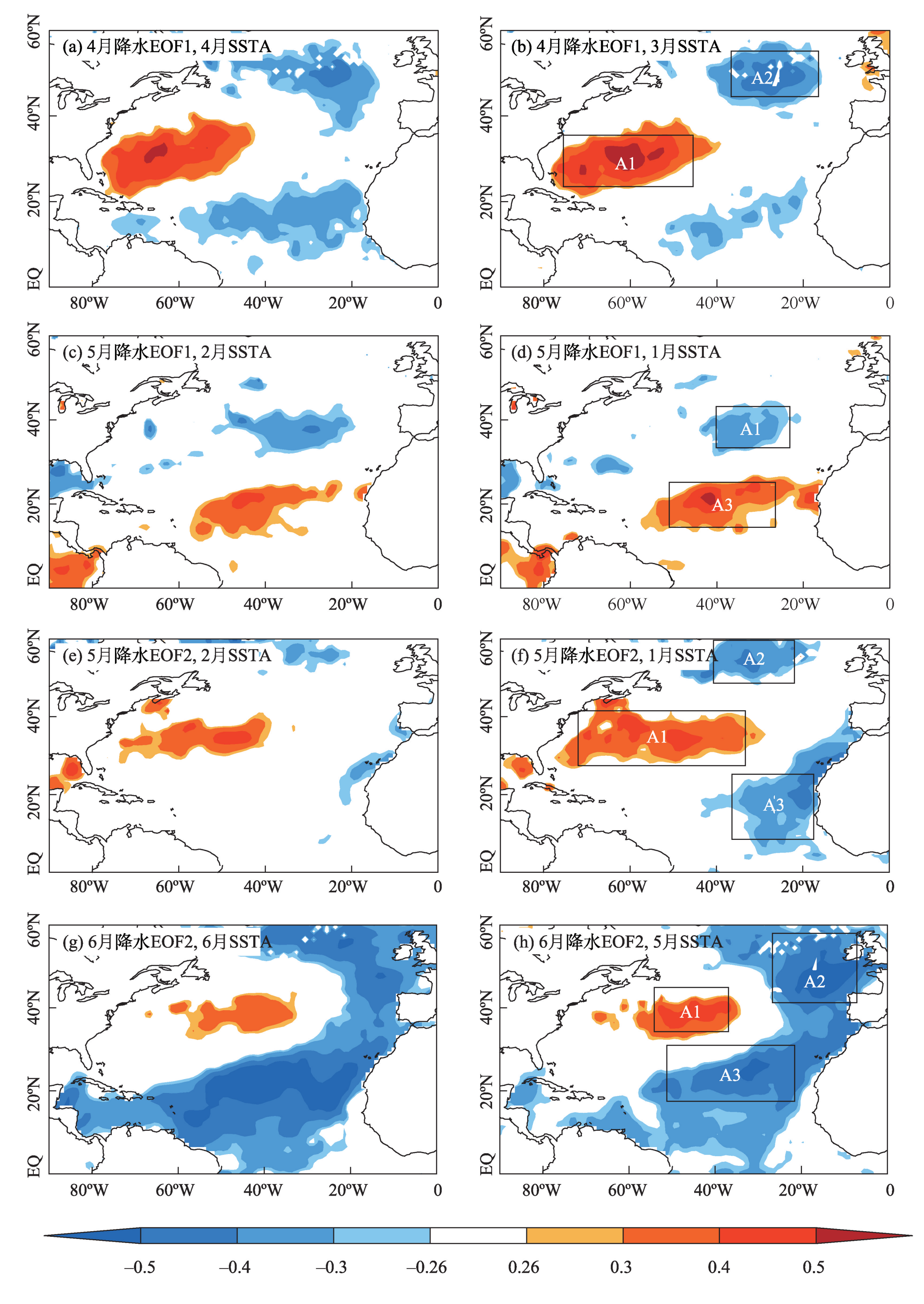
6月与4月、5月都不同,宁夏6月降水EOF2与北大西洋海温异常存在持续显著相关性,而EOF1与海温的相关性不显著。6月降水EOF2与前期12月—同期6月的海温都存在持续的显著相关,显著海温异常分布型为典型"三极子"分布(图4g,图4h),当海温超前3~5个月时,中纬度显著区域明显减小,显著区域主要位于高、低纬度。对应冬季12月持续到初夏6月的北大西洋"三极子型"正(负)位相,宁夏6月降水易出现北少南多(北多南少)。

综上所述,前期冬春季北大西洋海温异常为

chinaXiv:202305.00255v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202305.00255v1



注:阴影区通过了90%的显著性检验,A1、A2、A3方框区域分别为北大西洋中、高、低纬度相关显著区。下同。

图4　1981—2021年宁夏4—6月降水EOF1、EOF2时间系数与同期和前期北大西洋SSTA的相关分布

Fig. 4　The correlation distributions between EOF1 and EOF2 time series of precipitation anomaly in Ningxia from April to June and simultaneous and preceding SSTA of the North Atlantic in the period of 1981 and 2021

"三极子型"正(负)位相,即中纬度海温异常偏高(低),中、低纬度海温异常偏低(高),有利于宁夏春夏之交降水4月全区异常偏多(偏少)、5月全区异常偏少(偏多),北部偏少(偏多)更明显,6月北少南多(北多南少)。

3.2　海温异常与降水关系的年代际趋势

北大西洋"三极子型"模态与宁夏春夏之交4—6月降水异常显著相关,其与典型"三极子"海温异

ChinaXiv合作期刊

常分布型虽然相似，但是异常中心的区域位置和范围存在差异，为了分析两者的相似程度，根据图4中黑色方框所示的显著相关区域，定义"三极子型"海温指数，如公式(1)所示：

$$NATi = SSTA(A1) - SSTA(A2) - SSTA(A3) \quad (1)$$

式中：A1、A2和A3分别代表图4中北大西洋中纬度、高纬度和低纬度相关显著区域；SSTA(A1)、SSTA(A2)和SSTA(A3)分别代表A1、A2和A3区域内海温异常平均值(表2)，NATi代表NAT41、NAT51、NAT52和NAT62，即分别为宁夏4月降水EOF1、5月降水EOF1、5月降水EOF2和6月降水EOF2与北大西洋海温显著相关的"三极子型"指数。

表2 与宁夏4—6月降水异常显著相关的北大西洋海温异常区域范围

Tab. 2 The latitude and longitude range of the North Atlantic SSTA significantly associated with the precipitation from April to June in Ningxia

降水月份模态	相关显著区域范围
4月EOF1	A1(50°W ~ 80°W, 25°N ~ 35°N); A2(20°W ~ 40°W, 45°N ~ 55°N)
5月EOF1	A1(30°W ~ 40°W, 25°N ~ 40°N); A3(20°W ~ 50°W, 15°N ~ 25°N)
5月EOF2	A1(30°W ~ 70°W, 30°N ~ 40°N); A2(25°W ~ 40°W, 50°N ~ 60°N), A3(15°W ~ 30°W, 10°N ~ 25°N)
6月EOF2	A1(35°W ~ 55°W, 35°N ~ 40°N); A2(5°W ~ 25°W, 40°N ~ 60°N); A3(20°W ~ 50°W, 10°N ~ 25°N)

典型"三极子"指数NATI与"三极子型"指数NAT41、NAT51、NAT52和NAT62指数的相关系数为0.661~0.958(表3)，均远大于99%置信度检验临界值0.327，说明"三极子型"与典型"三极子"高度似度。

利用北大西洋"三极子型"海温指数，分析其与宁夏4—6月降水异常关系的年代际演变，为了便于

表3 北大西洋"三极子"指数(NATI)与"三极子型"指数的相关系数

Tab. 3 The correlation coefficients between the triple index (NATI) and triple type index of the North Atlantic Ocean

指数	月份					
	1	2	3	4	5	6
NAT41	0.766	0.759	0.848	0.857	0.859	0.793
NAT51	0.661	0.737	0.798	0.756	0.780	0.666
NAT52	0.910	0.931	0.958	0.944	0.926	0.901
NAT62	0.834	0.878	0.931	0.893	0.855	0.773

比较，将宁夏5月降水EOF1与海温指数的相关系数乘以-1(图5)。发现自20世纪60年代初以来相关关系均呈明显一致的增大趋势，20世纪80年代初期—中期均发生突变，相关性由不显著变为显著，且在小波动中有增大趋势。1998—2021年宁夏4月降水EOF1与前期2月"三极子型"指数NAT41相关最好，相关系数达0.565，大于置信度为95%和99%的临界值0.433和0.549；宁夏5月降水EOF1与前期1月NAT51关系最好，相关系数为0.652；宁夏5月降水EOF2与前期2月NAT52关系最好，相关系数为0.579；宁夏6月降水EOF2与4月NAT62关系最好，且在1991—2011年关系最显著，相关系数为0.650，1998—2021年相关性略有下降，相关系数为0.390，通过了90%显著性检验(临界值0.369)，但是未通过95%显著性检验。

因此，北大西洋"三极子型"海温异常与宁夏春夏之交4—6月降水异常主模态总体呈年代际增强趋势，20世纪80年代初期—中期以来相关性显著且在波动中有增大趋势，这为预测宁夏4—6月农事关键期的降水异常提供了前兆信号。

4 海温影响降水异常的大气环流成因

从已有研究可知，北大西洋海温异常大多是通过影响其上空的大气环流异常模态，即北大西洋涛动NAO，并通过影响北半球大气遥相关波列影响北大西洋以外地区的气候异常，北大西洋海温异常模态对宁夏降水的影响必然通过影响大气环流异常而实现。局地同期海温和大气之间相互影响，因此同期的相关性并不能代表海洋对大气的影响。而当海温超前大气时，与前期海温异常持续相关显著的大气环流异常可以代表是对海洋异常的响应。北大西洋海温异常具有较好的持续性，1—6月滞后相关系数绝大部分在0.7~0.9。正是持续异常的北大西洋海温通过影响北半球大气环流从而影响宁夏降水异常。通过分析北大西洋海温异常与500 hPa高度场、850 hPa风场异常及其辐合辐散等大气环流异常的相关性，以及TN波作用通量异常分布，来研究北大西洋海温异常影响宁夏4—6月降水异常的成因。用北大西洋典型"三极子"指数NATI和本文定义的"三极子型"NAT41、NAT51、NAT52和NAT62指数与北半球大气环流异常进行分析，其结

chinaXiv:202305.00255v1

ChinaXiv合作期刊

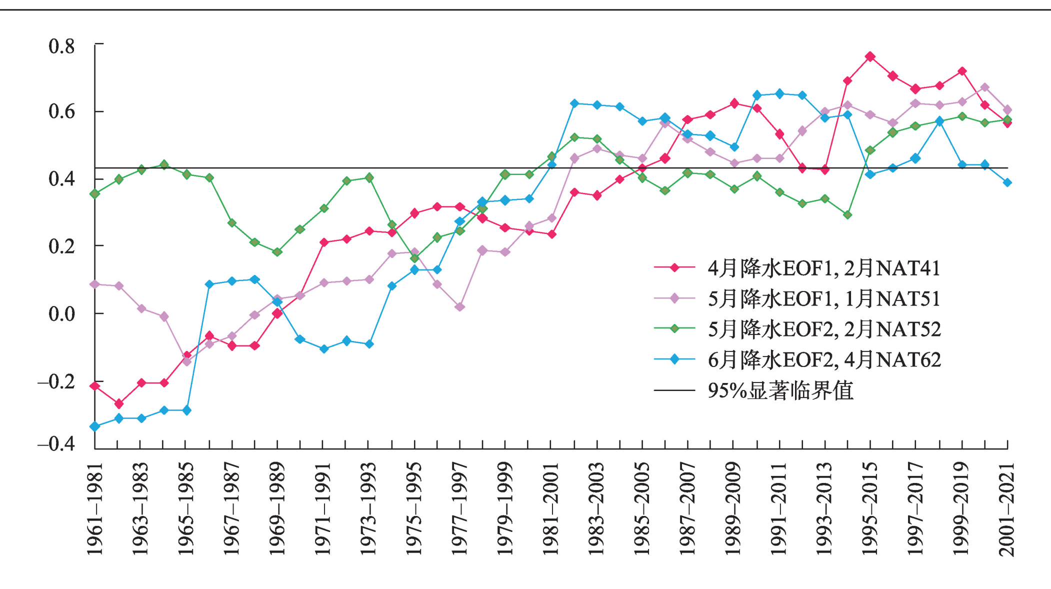


图5　宁夏4—6月降水EOF时间系数与北大西洋“三极子型”海温指数的21 a滑动相关

Fig. 5　The 21-year running correlations between EOF time series of the precipitation from April to June in Ningxia and triple type index of the North Atlantic SSTA

果非常相似,只是“三极子型”指数结果的显著区域更明显一些,本文采用NATI指数的结果进行分析。

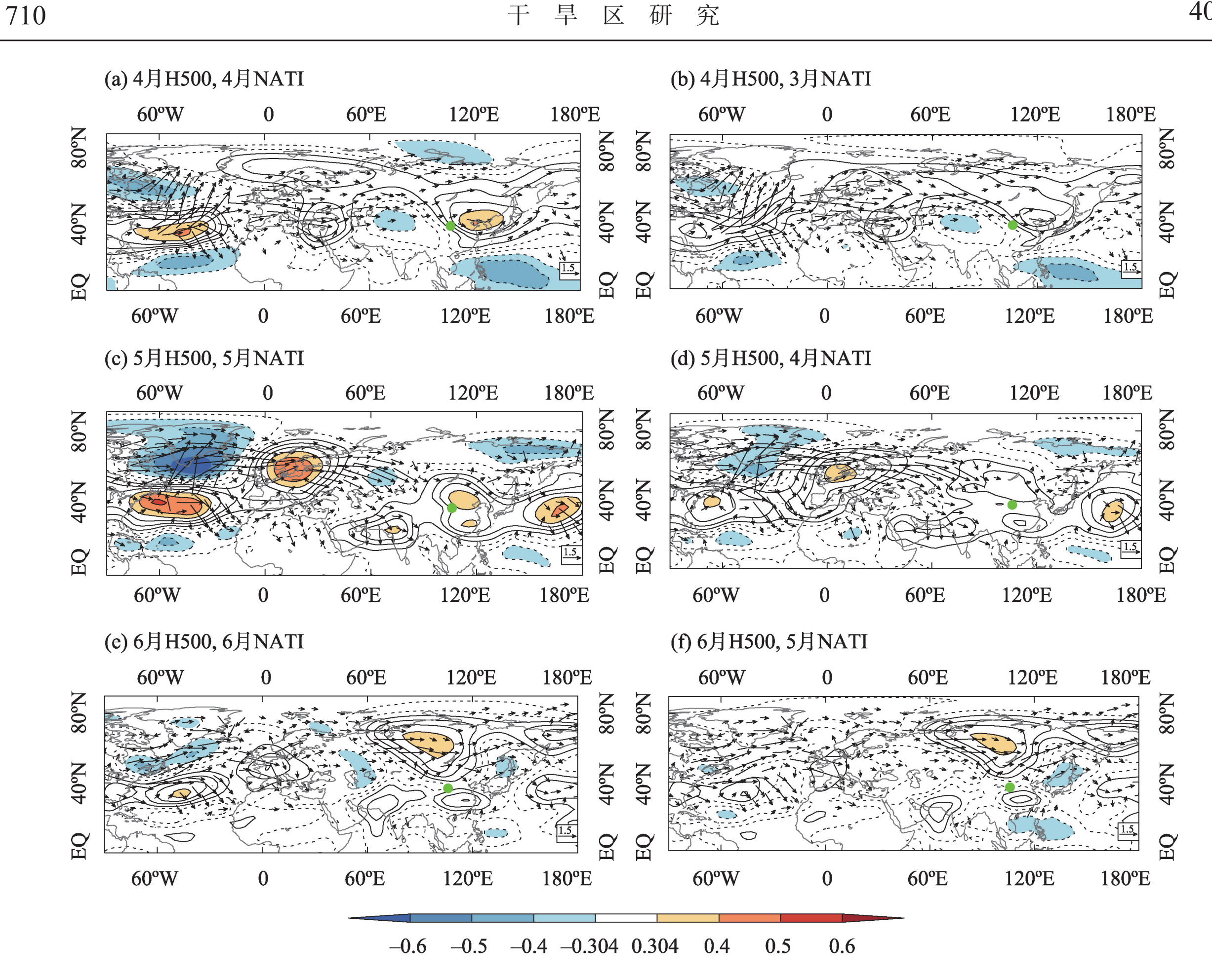
对应冬春季持续异常的北大西洋“三极子型”海温异常正位相,4—6月北大西洋区域500 hPa大气高度场异常在南北方向为“负-正-负”分布型,中高纬异常中心为典型的南北“跷跷板”NAO分布型。同时在欧亚从地中海—日本海的大范围区域存在明显的“正-负-正”高度场异常波列(图6),该波列在4—6月的异常强度和中心位置在各月存在差异。4月异常波列中心位置分别位于地中海东部、乌拉尔山,以及我国华北至东北地区(图6a,图6b),欧亚地区呈两脊一槽异常型,中高纬度以经向型异常为主,乌拉尔山地区负异常和华北东北地区正异常形成“西低东高”分布型,这与已有研究结论相一致[30]。宁夏受该“西低东高”异常环流控制,这也正是宁夏4月降水异常偏多的典型形势。

5月、6月异常波列分布型大体与4月相似,但异常中心的位置总体持续向北偏移,这与4—6月北半球随着从春季向夏季转换对应大气环流系统整体向北极移动相一致。4—5月位于我国东部的高度场正异常区域向北推进到贝加尔湖以南地区(图6c,图6d),显示出在南北形成两个正异常中心的趋势,北部贝加尔湖以南地区的正异常区域偏大偏强,宁夏位于该异常中心的西南部,受高度场正异常控制,降水总体易偏少,北部偏少更明显。5—6月贝加尔湖以南的正异常中心继续向北延伸至贝加尔湖以北地区(图6e,图6f),并与与我国东部地区的正异常中心分裂,形成两个正异常中心,贝加尔湖以北地区的异常偏大偏强。我国北方地区在这两个正异常中心之间为弱负异常过渡带,宁夏北部受“北高南低”异常形势控制,南部受“西低东高”异常环流控制,宁夏降水易出现北部偏少,南部偏多的EOF2模态。

为了进一步说明北大西洋海温异常为什么易引起宁夏6月南北降水异常符号相反的EOF2模态,而不是全区一致的EOF1模态,对比分析宁夏6月降水EOF1、EOF2异常对应的北半球500 hPa位势高度场异常分布(图7),发现宁夏6月降水异常EOF2模态对应的大气环流异常(图7b),总体与北大西洋海温异常引起大气环流异常分布(图6e,图6f)非常相似。对应宁夏6月降水北少南多异常分布型,大气环流异常在北大西洋从南到北为明显的+－+波列,北半球中高纬从北大西洋到欧亚贝加尔湖为高度场正异常,东亚从南到北为+－+高度场异常分布,宁夏南部受“西低东高”异常环流控制,北部受“北高南低”异常形势控制,而对应宁夏6月降水全区一致偏多的EOF1模态对应从乌拉尔山—贝加尔湖—日本区域至北太平洋的欧亚中高纬地区显著异常波列(图7a),这显然与北大西洋海温异常引起的6月大气环流异常明显不同。

chinaXiv:202305.00255v1

ChinaXiv合作期刊



注:阴影表示通过了置信度95%显著性检验,箭头矢量为TN波活动通量,绿色圆点为宁夏行政驻地。下同。

图6 北大西洋"三极子型"海温异常与500 hPa大气位势高度距平场(H500)相关图(等值线)

Fig. 6 The correction maps (contour) of the North Atlantic triple type SSTA index and 500 hPa atmospheric geopotential height anomaly fields (H500)

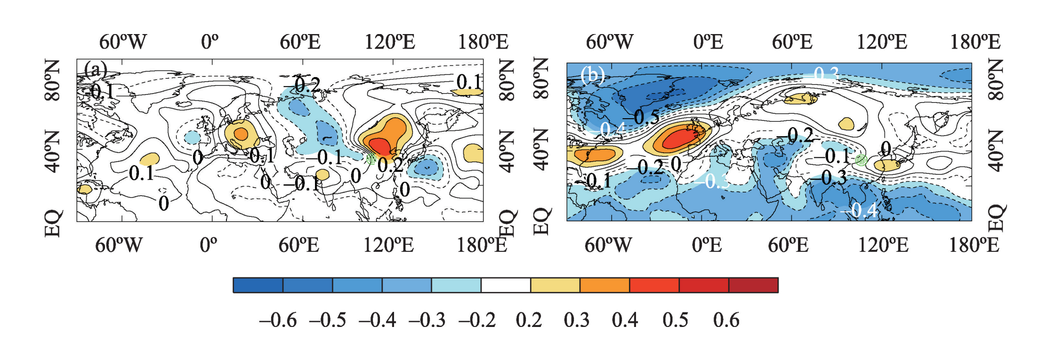


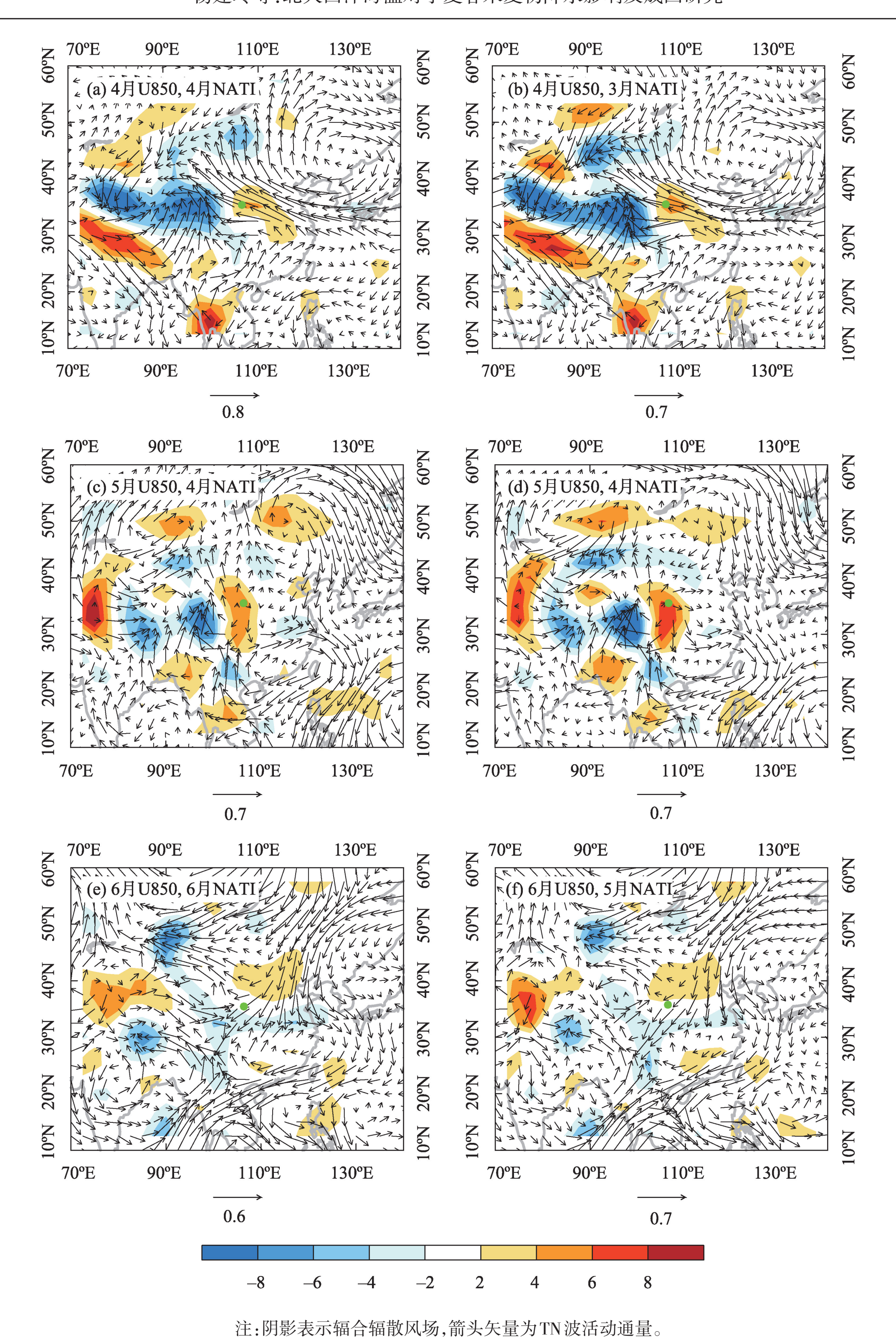
图7 宁夏6月降水EOF1 (a)、EOF2 (b)时间系数与500 hPa高度场异常相关系数(等值线)

Fig. 7 The correlation maps (contour) of the precipitation EOF1 (a)、EOF2 (b) time series in Ningxia and 500 hPa geopotential height anomaly fields in June

对流层低层,北大西洋"三极子型"海温异常也引起相应的风场异常(图8)。对应"三极子型"正位相,4月对流层低层宁夏受东北亚异常反气旋西南部异常东南风影响,输送异常偏多水汽,有利于降水异常偏多(图8a,图8b);5月受贝加尔湖到东亚异常反气旋控制(图8c,图8d),宁夏区域存在明显气流辐散,有利于降水偏少;6月宁夏北部受贝加尔湖区域大范围异常反气旋底部异常偏东北风影响(图8e,图8f),气流辐散,易造成降水偏少,而宁夏南部受东亚异常反气旋西部弱异常偏南风影响,并与宁夏北部较强的异常偏北风在宁夏南部相遇辐合,有利于降水偏多,故此形成宁夏6月南多北少的降水

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202305.00255v1



注:阴影表示辐合辐散风场,箭头矢量为TN波活动通量。

图8　北大西洋"三极子型"海温异常与850 hPa大气水平异常风场(U850)相关图

Fig. 8　The correction maps (vector) of the North Atlantic triple type SSTA index and 850 hPa atmospheric horizontal wind anomaly fields (U850)

异常分布型。对应"三极子型"异常负位相,大气环流异常的情况则相反。

综上所述,北大西洋海温异常对宁夏4—6月降水异常的影响,主要通过引起欧亚大陆异常波列而实现,这一点各月相似,但波列异常的地理位置和强度各月存在差异,该差异主要是由于随着北半球

ChinaXiv合作期刊

季节转换引起异常环流异常系统向北移动，从而引起宁夏降水异常分布模态各月差异。

5 结 论

（1）北大西洋海温与宁夏春末夏初4—6月降水异常的关系自1961年以来均呈增大趋势，20世纪80年代初以来，北大西洋"三极子型"海温异常对宁夏4—6月降水有持续的显著影响，对宁夏降水预测有明确指示意义。对应前期冬春季北大西洋"三极子型"海温异常正（负）位相，即北大西洋中纬度西部暖（冷）异常，高纬度和低纬度海域海温冷（暖）异常，宁夏降水易出现4月偏多（少），5月偏少（多），6月北少南多（北多南少）。

（2）前期冬春季北大西洋"三极子型"海温异常对后期4—6月的大气环流有持续显著的影响，在北大西洋区域表现为典型的南北"跷跷板"NAO异常分布，同时，在欧亚大范围从地中海到日本海存在显著波列，海温异常对宁夏4—6月降水的影响，主要通过引起欧亚大陆异常波列而实现，各月异常波列的中心位置和强度存在差异。

（3）"三极子型"海温异常正位相，4月在宁夏区域形成对流层中层500 hPa"西低东高"典型异常降水偏多环流形势，低层850 hPa偏南风异常，有利于南方暖湿气流输送，降水易偏多。5月较4月500 hPa波列的异常中心偏北、偏西，东亚地区高度场正异常中心向贝加尔湖地区伸展，宁夏受高度场正异常控制，低层为异常辐散风场，降水易偏少。6月500 hPa贝加尔湖以南地区正异常中心继续向北发展至贝加尔湖以北地区，并与我国东部正异常区域分裂成两个中心，使得宁夏北部受"北高南低"异常形势控制，南部受"西低东高"异常环流控制，低层宁夏北部为异常偏东北风，气流辐散，降水偏少，南部为弱异常偏南风，气流辐合，有利于降水偏多，形成南多北少型。对于北大西洋"三极子型"海温异常负位相,大气环流异常和降水异常则相反。

参考文献（References）：

[1] Delworth T L. North Altantic interannual variability in a coupled ocean-atmosphere model[J]. Journal of Climate, 1996, 9: 2356–2375.

[2] Bjerknes J. Atlantic air-sea interactions[J]. Advances in Geophysics, 1964, 10: 1–82.

[3] Cayan D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: Driving the sea surface temperature[J]. Journal of Physical Oceanography, 1992a, 22(8): 859–881.

[4] Cayan D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: The connection to monthly atmospheric circulation[J]. Journal of Climate, 1992b, 5(4): 354–369.

[5] Zhou T J, Zhang X H, Yu Y Q, et al. The North Atlantic oscillation simulated by versions 2 and 4 of IAP /LASG GOALS model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(4): 601–616.

[6] 曾鼎文, 李耀辉, 张文波, 等. CAM3.0模式中北大西洋风暴轴对"三核型"海温异常的响应[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 70–77. [Zeng Dingwen, Li Yaohui. Zhang Wenbo, et al. North Atlantic storm track response to "the Triple- Pattern" SST anomalies in CAM3.0[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(1): 70–77.]

[7] Sttton R T, Norton W A, Jewson S P. The North Atlantic Oscillation- What role for the ocean[J]. Atmospheric Science Letters, 2001, 1(2): 89–100.

[8] Kushnir Y, Robinson W A, Blade I, et al. Atmospheric GCM response to extra-tropical SST anomalies: Synthesis and evaluation [J]. Journal of Climate, 2002, 15(16): 2233–2256.

[9] Peng S L, Robinson W A, LI S L. North Atlantic SS T forcing of the NAO and relationships with intrinsic hemispheric variability [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(8): 1276.

[10] Rodwell M J, Rowell D P, Folland C K. Oceanic forcing of the winter time North Atlantic Oscillation and European climate[J]. Nature, 1999, 398: 320–323.

[11] Latif M, Collins M, Stouffer R J, et al. The physical basis for prediction of Atlantic sector climate on decadal time scales[J]. Journal of Climate, 2006, 19(23): 5971–5987.

[12] Wang S W, Zhou T J, Cai J N, et al. Abrupt climate change around 4 ka BP: Role of the thermohaline circulation as indicated by a GCM experiment[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21 (2): 291–295.

[13] 杨修群, 郭燕娟, 徐桂玉, 等. 年际和年代际气候变化的全球时空特征比较[J]. 南京大学学报（自然科学）, 2002, 38(3): 308–317. [Yang Xiuqun, Guo Yanjuan, Xu Guiyu, et al. Comparison of global spatio-temporal structures between interannul and interdecadal climate variations[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2002, 38(3): 308–317.]

[14] 武炳义, 黄荣辉. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风[J]. 大气科学, 1999, 23(6): 641–651. [Wu Bingyi, Huang Ronghui. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon[J]. Chines Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(6): 641–651.]

[15] Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D18): D18120.

[16] Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. Impact of the North Atlantic sea

chinaXiv:202305.00255v1

ChinaXiv合作期刊

surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon[J]. Advance Atmospherics Science, 2013, 30(4): 1173-1186.

[17] 李栋梁, 蓝柳茹. 西伯利亚高压强度与北大西洋海温异常的关系[J]. 大气科学学报, 2017, 40(1): 13-24. [Li Dongliang, Lan Liuru. Relationship between the intensity of the Siberian high and the SST anomaly in the North Atlantic[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(1): 13-24.]

[18] 李忠贤, 陈晨, 曾刚, 等. 春季热带大西洋北部海温异常与我国盛夏降水异常的联系[J]. 热带气象学报, 2019, 35(6): 756-766. [Li Zhongxian, Chen Chen, Zeng Gang, et al. Characteristic of north tropical Atlantic SSTA in spring and its relationship with midsummer precipitation in China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35(6): 756-766.]

[19] 容新尧, 张人禾, LI Tim. 大西洋海温异常在ENSO影响印度-东亚夏季风中的作用[J]. 科学通报, 2010, 55(14): 1397-1408. [Rong Xinyao, Zhang Renhe, LI Tim. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(14): 1397-1408.]

[20] Ham Y G, Kug J S, Park J Y, et al. Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/Southern Oscillation events[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(2): 112-116.

[21] Hong C C, Chang T C, Hsu H H. Enhanced relationship between the tropical Atlantic SST and the summer time western North Pacific subtropical high after the early 1980s[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(7): 3715-3722.

[22] 任宏昌, 左金清, 李维京. 1998年和2016年北大西洋海温异常对中国夏季降水影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2017, 75(6): 877-893. [Ren Hongchang, Zuo Jinqing, Li Weijing. The role of the North Atlantic SST anomalies in the 1988 and 2016 summer floods in China[J]. Acta Meteorological Sinica, 2017, 75(6): 877-893.]

[23] 袁媛, 高辉, 李维京, 等. 2016和1998年汛期降水特征及物理机制对比分析[J]. 气象学报, 2017, 75(1): 19-38. [Yuan Yuan, Gao Hui, Li Weijing. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998 [J]. Acta Meteorological Sinica, 2017, 75(1): 19-38.]

[24] 王鹏祥,杨建玲,李栋梁. 中国西北地区东部汛期降水异常成因及预测研究[M]. 北京: 气象出版社, 2021. [Wang Pengxiang, Yang Jianling, Li Dongliang. Study on the Causes and Prediction of Abnormal Precipitation in Flood Season in the Eastern part of Northwest China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2021.]

[25] 杨建玲, 李艳春, 穆建华, 等. 热带印度洋海温与西北地区东部降水关系研究[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 690-699. [Yang Jianling, Li Yanchun, Mu Jianhua, et al. Analysis of relationship between sea surface temperature in Tropical Indian Ocean and precipitation in east of Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(3): 690-699.]

[26] 蔡新玲, 李瑜, 李茜, 等. 1961—2016年陕西秋淋气候变化特征及其与大气环流和海温的关系[J]. 干旱气象, 2019, 37(2): 226-232. [Cai Xinling, Li Yu, Li Qian, et al. Climatic characteristics of autumn rain in Shanxi and their relationship with atmospheric circulation and SST during 1961-2016[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(2): 226-232.]

[27] 张雯, 马阳, 李欣, 等. 赤道太平洋海温异常对宁夏7月降水的影响[J]. 干旱气象, 2020, 63(4): 543-551. [Zhang Wen, Ma Yang, Li Xin, et al. Effect of equatorial Pacific SSTA on precipitation in July in Ningxia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 63(4): 543-551.]

[28] 郑广芬, 王素艳, 杨建玲, 等. 基于前期海温异常的宁夏5—9月候降水量客观预测方法及检验评估[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 43-50. [Zheng Guangfen, Wang Suyan, Yang Jianling, et al. Study on the objective prediction method and its verification and assessment for pentad precipitation from May to September in Ningxia based on the preceding SSTA anomaly[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1): 43-50.]

[29] 李常德, 王磊, 李晓霞, 等. 黄土高原4月旱涝环流特征及前期强迫信号分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 14-21. [Li Changde, Wand Lei, Li Xiaoxia, et al. Analysis on circulation characteristics of droughts and floods in April in Loess plateau and their earlier forcing signals[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(1): 14-21.]

[30] 卢国阳, 林纾, 王蕊, 等. 西北地区4月降水异常的环流特征及前兆海温信号[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1150-1260. [Lu Guoyang, Lin Shu, Wang Rui, et al. Anomalous circulation characteristics of precipitation anomalies in Northwest China in April and precursory SST signal[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1150-1260.]

[31] 王素艳, 纳丽, 王璠, 等. 海冰和海温对西北地区中部6月降水异常的协同影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 63-72. [Wang Suyan, Na Li, Wang Fan, et al. Synergistic effects of ice and sea surface temperature on the preicipation abnormal in June in the central part of Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2021, 44 (1): 63-72.]

[32] 施春华, 金鑫, 刘仁强. 大气动力学中三种Rossby作用通量的特征差异和适用性比较[J]. 大气科学学报, 2017, 40(6): 850-855. [Shi Chunhua, Jin Xin, Liu Renqiang. The differences in characteristics and applicability among three types of Rossby wave activity flux in atmospheric dynamics[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(6): 850-855.]

[33] 张梦, 陶丽, 邵海燕. 北大西洋涛动/北极涛动与中国冷事件频数年际和年代际变化的联系及其差异[J]. 高原气象, 2022, 41 (4): 850-863. [Zhang Meng, Tao Li, Shao Haiyan. Relationship between NAO/AO and interannual and interdecadal variations of Cold Wave Frequency (CWF) in China[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(1): 850-863.]

chinaXiv:202305.00255v1

ChinaXiv合作期刊

The impact of the North Atlantic sea surface temperature anomaly on precipitation anomaly in Ningxia from late spring to early summer and associated mechanisms

YANG Jianling[1,2,3] ZHANG Suzhao[1,2] MA Junbin[1,2] WANG Dai[1,2] Huang Yin[1,2]

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agricultural in Dry Areas Regions, CMA, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Key Lab for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Institute of Meteorological Science of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: This study was conducted to reveal the impact and mechanism of the North Atlantic sea surface temperature anomaly (SSTA) associated with Ningxia precipitation and to improve the accuracy of precipitation prediction ability in Ningxia. Based on the monthly precipitation data of 20 meteorological stations in Ningxia, NCEP/NCAR atmospheric data, Hadley center sea surface temperature data, and utilizing empirical orthogonal decomposition, composite, and correlation methods, we studied the relationships and their decadal changes between the North Atlantic SSTA and Ningxia precipitation anomaly from late spring to early summer (April-June). It was found that the relationship had continuously increased since 1961 but nonsignificantly until the 1980s. Since then, the North Atlantic Ocean “triple type” (NAT) SSTA in early winter and spring has caused precipitation anomalies in Ningxia from April to June but it differs each month. Corresponding to the positive (negative) phase NAT, Ningxia precipitation is more (less) in April, less(more) in May, and less northerly and more southerly (more northerly and less southerly) in June. Furthermore, the mechanism is revealed of NAT affecting Ningxia precipitation anomaly by inducing an atmosphere anomaly wave train in the area from Europe to the Asia-Pacific. The positivephase NAT can induce a wave train with atmosphere circulation anomaly pattern of geopotential height “west lower and east higher” at 500 hPa around Ningxia in April, which is the typical atmosphere anomaly pattern of more precipitation in Ningxia in April. Additionally, at the low layer of 850 hPa, the southerly wind anomalies transform warmer and humid air into Ningxia, contributing to more precipitation. In May and June, with the transition from spring to summer, the abnormal wave train polar shifts. In May, Ningxia is affected by the positive abnormal height field at 500 hPa in Baikal Lake area to East Asia, and the abnormal wind field in the low level of 850 hPa divergence, with less precipitation. In June, the positive height anomaly center at 500 hPa in East Asia continues to develop northward from south to north to Baikal Lake area, and splits from the positive anomaly height in the east of China into two anomaly centers. At 500 hPa, Ningxia north and south areas are affected by the atmospheric circulation pattern of geopotential height anomaly being “north higher and south lower” and “west lower and east higher”, respectively. Meanwhile, at low level 850 hPa weak northerly and southerly anomaly wind prevails in the north and south area of Ningxia respectively, being with divergence and convergence. All of these atmosphere anomalies are conducive to less precipitation in the north and more in the south of Ningxia. For negative NAT phase, all the atmospheric circulation and precipipation anomalies are vice versa.

Keywords: the North Atlantic; Triple type SST anomaly; precipitation; impact and mechanism; Ningxia

chinaXiv:202305.00255v1